

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ  
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«КАЗАНСКИЙ (ПРИВОЛЖСКИЙ) ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»  
НАБЕРЕЖНОЧЕЛНИНСКИЙ ИНСТИТУТ (ФИЛИАЛ)

**Г. Х. Тазмеев, Х. К. Тазмеев, Д. А. Вальтеев**

## **Стоячие звуковые волны в трубе Рубенса**

*Учебно-методическое пособие  
к лабораторному практикуму по физике*

Набережные Челны  
2025

**УДК 534.2:53(076)**  
**T13**

*Печатается по рекомендации Учебно-методической комиссии  
Высшей технической школы Набережночелнинского института (филиала) Казанского  
(Приволжского) федерального университета  
(протокол №1.3.2.37-01/01 от 24.11.2025 г.)*

**Рецензенты:**

кандидат технических наук, доцент **А. Т. Галиакбаров;**  
кандидат технических наук, доцент **Д. Д. Фазуллин**

**T13** **Стоячие звуковые волны в трубе Рубенса:** учебно-методическое пособие / Г.Х. Тазмеев, Х.К. Тазмеев, Д.А. Вальтеев – Набережные Челны: Отдел информации и связей с общественностью Набережночелнинского института КФУ, 2025. – 15 с. – 1444 КБ (PDF) / – Текст: электронный

Учебное пособие составлено в соответствии с рабочей учебной программой дисциплины «Физика» для технических специальностей и предназначено в помощь студентам I курса, проходящим лабораторный практикум по молекулярной физике и термодинамике.

© Тазмеев Г. Х., Тазмеев Х. К., Вальтеев Д. А.  
© Набережночелнинский институт КФУ, 2025

## СОДЕРЖАНИЕ

1. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ РАБОТЫ.....	4
1. Принцип действия .....	4
2. Стоячие звуковые волны .....	5
3. Визуализация пламени.....	5
4. Теоретическое выражение для скорости звука .....	6
5. Общее определение .....	6
6. Вывод формулы для идеального газа.....	7
7. Практическое выражение через температуру .....	8
8. Анализ формулы.....	8
9. Практическое использование формулы .....	8
2. ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ И ПРАКТИЧЕСКОЙ ЧАСТИ.....	10
1. Назначение установки .....	10
2. Состав установки.....	10
3. Принцип действия .....	10
3. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ И ОБРАБОТКИ РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ.....	12
4. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ .....	13
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	14

## Лабораторная работа

### «Стоячие звуковые волны в трубе Рубенса»

**Цель работы:** исследование стоячих звуковых волн в газе с использованием трубы Рубенса, определение скорости распространения звука, а также установление связи между частотой звуковых колебаний, длиной волны и визуальным распределением пламени.

## 1. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ РАБОТЫ

Труба Рубенса - это классический физический эксперимент, демонстрирующий распределение **стоячих звуковых волн** в газе. Установка позволяет визуализировать акустическое давление с помощью **пламени газа**, поступающего из отверстий трубы.

### 1. Принцип действия

Металлическая труба имеет равномерно расположенные отверстия в верхней части, через которые выходит горючий газ. Один конец трубы соединён с газовым баллоном, а к другому подсоединён **динамик**, возбуждающий звуковые колебания внутри трубы.

При подаче звука определённой частоты в трубе возникает **стоячая волна** - результат наложения падающей и отражённой звуковых волн. Давление и скорость частиц газа в разных точках трубы изменяются по закону гармонического колебания:

$$p(x, t) = p_{\max} \cdot \cos(kx) \cdot \cos(\omega t) \quad (1)$$

где  $p(x, t)$  - мгновенное значение звукового давления;

$p_{\max}$  - амплитуда колебаний давления;

$k$  - волновое число;

$\omega$  - циклическая частота;

$x$  - координата;

$t$  - время.

## 2. Стоячие звуковые волны

При подаче звука определённой частоты в трубе Рубенса возникает **стоячая звуковая волна** - результат интерференции, падающей и отражённой звуковых волн внутри трубы.

В местах, где давление изменяется минимально (узлы давления), пламя поднимается выше, а там, где давление периодически возрастает (пучности давления), пламя становится ниже. Таким образом, пламя визуализирует распределение звукового давления вдоль трубы.

При изменении частоты сигнала от генератора наблюдаются различные картины пламени. На определённых частотах устанавливается **резонанс**, и пламя выстраивается в устойчивый волнообразный рисунок, соответствующий стоячей волне.

Измеряя расстояние между соседними узлами (что соответствует половине длины звуковой волны  $\lambda / 2$ ) и зная частоту звука  $f$ , можно вычислить **скорость распространения звука в газе** по формуле:

$$v = f \lambda \quad (2)$$

## 3. Визуализация пламени

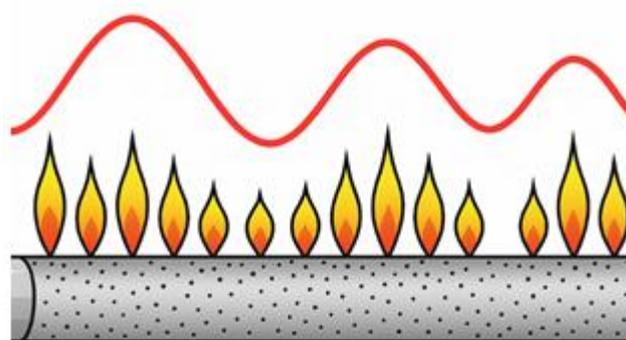
Высота пламени над каждым отверстием зависит от **местного звукового давления**.

В **узлах** давление минимально, пламя поднимается выше.

В **пучностях** давление максимальное, пламя прижимается ниже.

Таким образом, пламя образует **волнообразную картину**, соответствующую форме стоячей волны.

## СТОЯЧИЕ ЗВУКОВЫЕ ВОЛНЫ



### в трубе Рубенса

Рисунок 1 - Картина пламени соответствует распределению давления звука

#### 4. Теоретическое выражение для скорости звука

Звук представляет собой упругие продольные волны, распространяющиеся в среде за счёт чередования участков **сжатия** и **разрежения**.

Скорость распространения этих волн определяется упругими и инерционными свойствами среды.

Чем сильнее упругие силы и меньше инерционность частиц, тем выше скорость звука.

#### 5. Общее определение

В любой среде скорость звука можно выразить через отношение модуля объемной упругости (или показателя адиабаты) к плотности среды:

$$v = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (3)$$

$v$  - скорость звука,

$E$  - модуль объемной упругости (для газов - адиабатическая сжимаемость),

$\rho$  - плотность среды.

Для **идеального газа** это выражение преобразуется с учётом закона Менделеева–Клапейрона

$$pV=nRT \quad (4)$$

## 6. Вывод формулы для идеального газа

При распространении звуковых волн процесс сжатия и разрежения газа происходит достаточно быстро, чтобы теплообменом с окружающей средой можно было пренебречь.

Поэтому процесс считается **адиабатическим**, и для него выполняется соотношение:

$$pV^\gamma = const \quad (5)$$

$p$  - давление,

$V$  - объём,

$\gamma = \frac{c_p}{c_v}$  - показатель адиабаты (отношение теплоёмкостей при постоянном давлении и объёме).

Дифференцируя выражение  $pV^\gamma = const$  и преобразуя его с использованием зависимости плотности  $\rho = \frac{m}{V}$ , получаем:

$$E = \frac{\gamma p}{\rho} \quad (6)$$

Подставив это в общее уравнение для скорости звука, имеем:

$$v = \sqrt{\frac{\gamma p}{\rho}} \quad (7)$$

## 7. Практическое выражение через температуру

Для идеального газа по уравнению состояния

$$p = (\rho R T) / \mu, \quad (8)$$

$R$  - универсальная газовая постоянная,

$\mu$  - молярная масса газа,

$T$  - температура в Кельвинах.

Подставляя это выражение в формулу скорости звука, получаем окончательный вид:

$$v = \sqrt{\frac{\gamma R T}{\mu}} \quad (9)$$

## 8. Анализ формулы

Из полученного выражения видно, что скорость звука в газе:

**увеличивается с ростом температуры**  $v \propto \sqrt{T}$ ;

**не зависит от давления**, так как  $p$  и  $\rho$  изменяются пропорционально;

**уменьшается при увеличении молярной массы газа**, т.е. в лёгких газах звук распространяется быстрее, чем в тяжёлых.

Например, при комнатной температуре ( $T=293\text{K}$ ) скорость звука составляет:

в воздухе  $\approx 343$  м/с,

в гелии  $\approx 1000$  м/с,

в углекислом газе  $\approx 260$  м/с.

## 9. Практическое использование формулы

Формула (9)  $v = \sqrt{\frac{\gamma R T}{\mu}}$  используется для:

- расчёта скорости звука в различных газовых смесях,
- анализа данных акустических измерений,
- оценки температуры газа по измеренной скорости звука,

- калибровки ультразвуковых и акустических датчиков.

В данной лабораторной работе экспериментально определяется скорость звука в газе на основе наблюдения стоячих волн в трубе Рубенса, а теоретическое выражение служит для сравнения экспериментального результата с расчётным значением.

## 2. ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ И ПРАКТИЧЕСКОЙ ЧАСТИ

### 1. Назначение установки

Установка предназначена для экспериментального исследования стоячих звуковых волн в газе и определения скорости звука методом наблюдения картины пламени в трубе Рубенса. Принцип работы основан на изменении высоты пламени в зависимости от звукового давления внутри трубы.

### 2. Состав установки

В установку входят следующие основные элементы:

1. **Металлическая труба Рубенса** длиной около 1 м, с равномерно расположенными отверстиями ( $\approx 2-3$  мм) в верхней части.
2. **Газовый баллон** (пропан, бутан или их смесь) с редуктором для подачи горючего газа.
3. **Шланг подачи газа**, соединяющий баллон с трубой.
4. **Динамик (громкоговоритель)**, соединённый с генератором звуковых колебаний.
5. **Система воспламенения газа** (зажигалка или пьезоэлемент).
6. **Генератор сигналов**, виртуальный запущенный через компьютер.
7. **Измерительные приборы**: термометр, линейка

### 3. Принцип действия

Газ под давлением поступает в трубу и выходит наружу через отверстия, образуя ряд пламени.

Когда к одному из концов трубы подсоединяется динамик, создающий звуковые колебания, внутри трубы возникает стоячая волна.

Из-за неравномерности звукового давления пламя в разных точках меняет высоту:

- в узлах (где давление минимально) - пламя выше;

- в пучностях (где давление максимальное) - пламя ниже.

При изменении частоты сигнала через компьютер, можно наблюдать перестройку картины пламени и фиксировать частоты, при которых образуется чёткий волновой рисунок - резонанс.

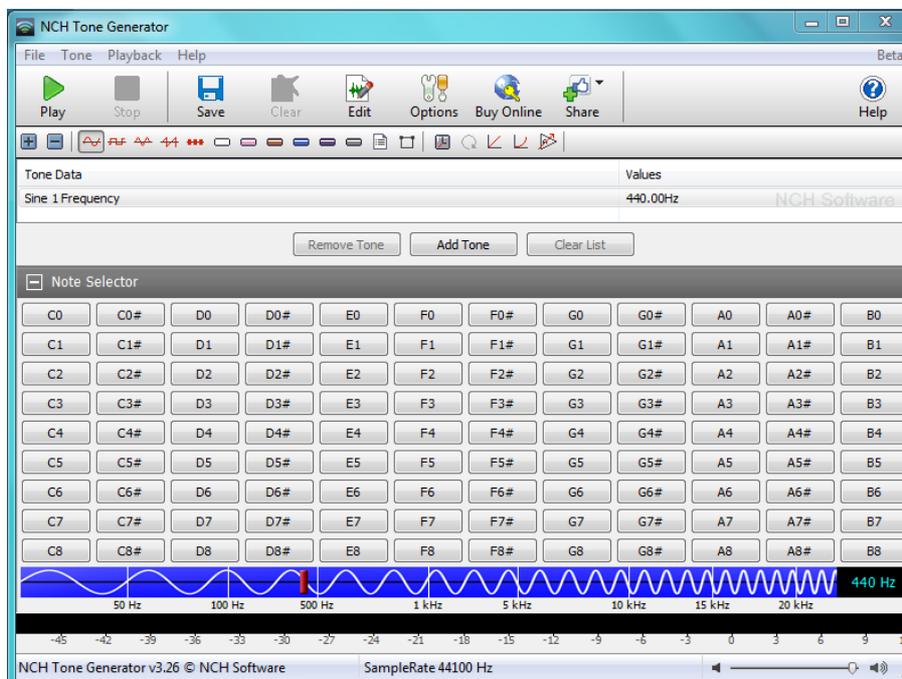


Рисунок 2 - Снимок экрана: генератор сигналов (NCH Tone Generator),  $f = 440$  Гц



Рисунок 3 - Картина стоячей звуковой волны в трубе Рубенса при резонансной частоте

### 3. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ И ОБРАБОТКИ РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ

#### Техника безопасности

- Проверить отсутствие утечек газа до поджигания.
- Не направлять пламя на предметы и людей.
- Не менять настройки подачи газа во время горения.
- После окончания опыта перекрыть газ и дать трубе остыть.

#### Порядок выполнения работы:

1. Проверить герметичность всех соединений и устойчивость трубы.
2. Подключить динамик к компьютеру через mini-jack (3,5 мм).
3. Включить подачу газа, поджечь пламя, убедиться, что пламя ровное по всей длине.
4. Включить генератор частот на компьютере и плавно изменять частоту.
5. Наблюдать картину пламени. Зафиксировать частоты, при которых пламя выстраивается в устойчивую волну (1-я, 2-я и т.д. гармоники).
6. Измерить расстояние между соседним пиковыми узлами, с помощью линейки - это будет половина длины волны:
7. По известной частоте  $f$  и измеренному  $\lambda$  вычислить скорость звука в газе по формуле (2)
8. По формуле (9) посчитать теоретическую скорость и сравнить значения. Измерьте  $T$  по термометру.  $\mu \approx 0,050$  кг/моль (Средняя для смеси (пропан:бутан  $\approx 60:40$ ),  $R = 8,31$  Дж/(моль  $\cdot$  К),  $\gamma = 1,13 - 1,14$  (для пропана или бутана).

Таблица 1 - Результаты экспериментов

№ наблюдения	$f$ , Гц	$\lambda/2$ , см	$\lambda$ , м	$v$ , м/с

#### 4. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что представляет собой стоячая звуковая волна и при каких условиях она возникает?
2. Почему высота пламени в трубе Рубенса изменяется при изменении звукового давления?
3. Как определяется длина звуковой волны по результатам наблюдений в трубе Рубенса?
4. Почему для лёгких газов скорость звука выше, чем для тяжёлых?
5. Какие факторы могли вызвать расхождение между теоретическим и экспериментальным значениями скорости звука?

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лабораторный практикум по общей физике: Колебания и волны. - Казань: Казанский федеральный университет, 2022. - 54 с.
2. Ландсберг Г. С. Элементы физической акустики. - М.: Наука, 1973. - 280 с.
3. Рубенс Г. (Rubens H.) Flammenrohr zur Demonstration stehender Schallwellen. Annalen der Physik, 1905, Bd. 18, S. 149–153.
4. Савельев И. В. Курс общей физики. Том II. Колебания и волны. - М.: Наука, 1989. - 432 с.
5. Сивухин Д. В. Общий курс физики. Том I: Механика. Том II: Термодинамика и молекулярная физика. - М.: Физматлит, 2005.
6. Трофимова Т. И. Курс физики. - М.: Академия, 2019. - 656 с.
7. Хайкин С. Э., Пинский И. А. Практикум по общей физике. Том 2: Колебания и волны. - М.: Наука, 1982. - 256 с.

*Электронное учебное издание*

**Гаяз Харисович Тазмеев**  
**Харис Каюмович Тазмеев**  
**Данила Альбертович Вальтеев**

## **Стоячие звуковые волны в трубе Рубенса**

В авторской редакции

Редактор  
***Г. Ф. Таипова***

Компьютерная верстка  
***Н. Н. Савицкая***

Подписано к использованию 24.11.2025. Объем 1065 КБ  
Уч.-изд. л. 0,30. Заказ 1886

Отдел информации и связей с общественностью  
Набережночелнинского института  
Казанского (Приволжского) федерального университета

---

423810, г. Набережные Челны, Новый город, проспект Мира, 68/19.  
тел. (8552) 38-47-68, e-mail: ic-nchi-kpfu@mail.